PART6 ハッブル・ルメートルの法則

目標　銀河の後退速度の求め方や，その後退速度と銀河までの距離との関係について説明できる。

Chapter1　ハッブル・ルメートルの法則

宇宙に分布する銀河の位置関係は，つねに変化しています。ここでは，その変化のようすや，そこからわかることについて学びましょう。

銀河の後退速度

・**赤方偏移**

銀河のスペクトルを観測すると，ほとんどの銀河について，線スペクトルの位置〔波長〕が本来の位置より波長の（長い / 短い）方にずれて見える。これを**赤方偏移**という。

・**赤方偏移の表し方**

ある銀河のスペクトルについて，静止しているときの波長を λ_0，観測される波長を $\lambda_0 + \Delta\lambda$ としたとき，

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

で表される値 z は線スペクトルによらず一定であり，**赤方偏移**と呼ばれる。

・**赤方偏移と後退速度**

多くの銀河は地球から見て遠ざかっており，その視線速度を**後退速度**という。$|z|$ が 1 より十分小さいとき，光速度 c，後退速度 v，赤方偏移 z の間には

$$z = \frac{v}{c}$$

が成り立つ。

→赤方偏移を観測すれば，銀河の後退速度が求められる。

知っておこう

特殊相対性理論に基づき，z の値によらず

$$z = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1$$

と表せることが知られています。$|z|$が 1 より十分小さいときは，これを本文中に示したような簡単な形で近似できるのです。

ハッブル・ルメートルの法則

・ハッブル・ルメートルの法則

銀河の後退速度は銀河の地球から見た方向によらず，銀河までの距離に（比例 / 反比例）している。すなわち，銀河の後退速度を v，銀河までの距離を r とすると，定数 H_0 を用いて

$$v = H_0 r$$

と表せる。

これを**ハッブル・ルメートルの法則**といい，H_0 を**ハッブル定数**という。近年の研究では $H_0 \fallingdotseq 70\text{km/s/Mpc}$ とされている〔ただし，pc はパーセクを表し，$1\text{Mpc} = 1 \times 10^6\ \text{pc}$〕。

・宇宙膨張

銀河が方向によらず遠ざかっていることは，宇宙全体が膨張していると考えれば説明できる。これを**宇宙膨張**という。

・ハッブル時間

宇宙が現在と同じ速度で膨張し続けてきたとすると，過去のある時刻で宇宙は1点に集まっていたことになる。この時刻から現在までの時間をハッブル時間といい，宇宙の年齢の目安となる。

・宇宙の地平線

光速度 c と宇宙の年齢 t_0 はともに有限なので，地球から観測できる宇宙には限りがある。その限界を示す，地球を中心とする半径 ct_0 の球を**宇宙の地平線**という。

知っておこう

1927年，ベルギーのルメートル (Georges Lemaître) は，アインシュタインの一般相対性理論をもとにして宇宙が膨張しているという解を導き，それによって銀河の後退速度と銀河までの距離との比例関係を説明しました。しかし，彼の論文はベルギーの雑誌にフランス語で掲載されたため，しばらくの間は脚光を浴びませんでした。

1929年，アメリカのハッブル (Edwin Hubble) は，銀河の後退速度と銀河までの距離の関係を散布図に描き，それらが原点を通る直線によって近似されることを示しました。また，その結果を宇宙の膨張と関連付けました。ハッブル定数は彼の名前に因んで名づけられたものです。

まとめ

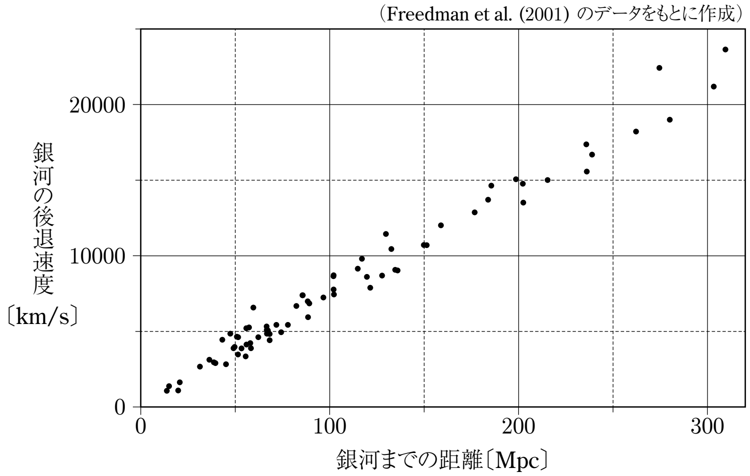
- ほとんどの銀河は地球から遠ざかっており，その後退速度は__________をもとに求められる。
- 銀河の後退速度は銀河までの距離に比例しており，このことを____________の法則という。
- この法則は，宇宙が_______していることを示している。

Chapter2　演習問題

ここでは，ハッブル・ルメートルの法則と，それに関連することがらについて確認しましょう。

問題(1)　次の図は，銀河までの距離と銀河の後退速度との関係を示しています。この図について述べた下の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

（Freedman et al. (2001) のデータをもとに作成）



ハッブル・ルメートルの法則は，銀河までの距離を r，銀河の後退速度を v，ハッブル定数を H_0 としたとき，

$$v = H_0 r \qquad \cdots\cdots①$$

が成り立つという法則である。

上の図から得られるハッブル定数 H_0 の値は, およそ（20 / 70 / 200 / 700）km/s/Mpc である。この H_0 の単位は，銀河までの距離が（1km / 1Mpc）大きくなるごとに，後退速度が何 km/s だけ大きくなるかを表している。

問題⑵　ハッブル時間について述べた次の文章中の空欄［ **ア** ］・［ **イ** ］に入る式を答えましょう。また，空欄［ **ウ** ］に入る数値を上から1桁の概数で答えましょう。

宇宙が1点から始まり，現在と同じように膨張し続けてきたと仮定する。また，宇宙が誕生してから現在までの時間を t_H とする。

このとき，それぞれの銀河は，銀河系からの後退速度 v を保ち，t_H の時間をかけて距離 r だけ離れたと考えることができる。すなわち，r は v と t_H を用いて

r ＝［ **ア** ］　……②

と表せる。①式と②式より，

t_H ＝［ **イ** ］　……③

が得られる。1Mpc ＝ 1×10^6 pc，1pc ＝ 3光年，光速度 $c = 3 \times 10^5$ km/s とすると，**問題⑴**と③式より

t_H ＝［ **ウ** ］年

と求められる。この時間をハッブル時間と呼ぶ。

ここがPOINT

1光年は，光速度で進んだときに1年かかる距離です。そのため，距離が光年の単位で表されているとき，速さが光速度の何倍かがわかれば，所要時間を年の単位で求めることができます。

問題⑶　赤方偏移について述べた次の文章中の（　　）について，正しいものを選びましょう。

ある銀河のスペクトルについて，静止しているときの波長を λ_0，観測される波長を $\lambda_0 + \Delta\lambda$ としたとき，

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

で表される値 z を赤方偏移と呼ぶ。

ここで，赤方偏移は宇宙膨張によって空間が広がることによって生じるものである。よって，赤方偏移が z の光は，放射されてから現在までに宇宙の大きさが（ z ／ $1+z$ ／ $1-z$ ）倍になったことを示している。

ここがPOINT

講義で学んだように，赤方偏移は，ハッブル・ルメートルの法則にある銀河の後退速度を求めるために利用されます。

問題⑶は，赤方偏移を過去の宇宙の大きさの推定に利用することもできる，ということを表しています。

第 21 講　PART6　確認問題

問 1　次の文章を読み，下の問いに答えよ。

ある銀河のスペクトルについて，静止しているときの波長を λ_0，観測される波長を $\lambda_0 + \Delta\lambda$ とすると，$z = \dfrac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ は線スペクトルによらず一定の値をとり，（　ア　）と呼ばれる。$|z|$ が 1 より十分に小さいとき，z は，銀河の後退速度 v と光速度 c を用いて，$z =$（　イ　）と表される。

銀河の後退速度は，地球からの距離に比例する。これを（　ウ　）の法則といい，a 宇宙全体が膨張していることを示している。

(1)　空欄ア，イに入る語句または式の組合せとして最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　ア：赤方偏移　　イ：$\sqrt{cv}$

②　ア：赤方偏移　　イ：$\dfrac{v}{c}$

③　ア：青方偏移　　イ：$\sqrt{cv}$

④　ア：青方偏移　　イ：$\dfrac{v}{c}$

(2)　空欄ウに入る語句として最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

①　シュテファン・ボルツマン

②　ケプラー

③　ハッブル・ルメートル

④　ドップラー

(3) 下線部 a について，宇宙が現在と同じ速度で膨張し続けてきたと仮定したとき，宇宙が 1 点に集まっていたことになる時刻を考えることができる。このことから何を推測することができるか。最も適当なものを，次の①～④のうちから一つ選べ。

① 恒星の寿命
② 宇宙の年齢
③ 銀河の数
④ 宇宙の地平線までの距離

第 21 講　銀河と宇宙

PART1　銀河系の構造

問題(1)　円盤部，バルジ，星間物質

問題(2)　球状星団，3 万光年，7.5 万光年

問題(3)　電波，電波や赤外線，X 線

PART2　銀河系の天体の運動

問題(1)　$\frac{1}{8000}$ 秒角，1.0×10^{10}，2 億年

問題(2)　ア：$\frac{2\pi a}{P}$　イ：$\frac{av^2}{4\pi^2}$

a，比例

PART3　さまざまな銀河

問題(1)　−22，クェーサー

問題(2)　棒渦巻き銀河，紫外線，赤外線，セイファート銀河

問題(3)　楕円銀河，電波銀河

PART4　宇宙の距離はしご

問題(1)　ア：500　イ：−4.5　ウ：400　エ：−7.5

問題(2)　【※図参照】

問題(3)　オ：10^7

問題(4)　カ：10^9

PART5　宇宙の階層構造

問題(1)　30′

ア：120

問題(2)　8 分 20 秒

イ：60000

問題(3)　①：A　②：B　③：D　④：F　⑤：H　⑥：I　⑦：J

PART6　ハッブル・ルメートルの法則

問題(1)　70，1Mpc

問題(2)　ア：vt_{H}　イ：$\dfrac{1}{H_0}$　ウ：1×10^{10}

問題(3)　$1 + z$

PART7　宇宙の誕生と進化

問題(1)　ア：0.06　イ：8　ウ：0.94

問題(2)　小さい，加速

問題(3)　70 ~ 60，減速，加速，ダークエネルギー

第 21 講　PART6　確認問題　解答

問 1

(1)　②

解説：

観測される銀河のスペクトル中の線スペクトルの波長が本来より長い方にずれて見えることを赤方偏移という。赤方偏移 z は，銀河のスペクトルについて静止時の波長を λ_0，観測される波長を $\lambda_0 + \Delta\lambda$ とすると，$z = \dfrac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ と表される。また，$|z|$ が 1 より十分に小さいとき，銀河の後退速度 v と光速度 c を用いて，$z = \dfrac{v}{c}$ と表される。

(2)　③

解説：

ハッブル・ルメートルの法則は，銀河の後退速度を v，銀までの距離を r とすると，ハッブル定数 H_0 を用いて，$v = H_0 r$ と表される。

(3)　②

解説：

宇宙が 1 点に集まっていた時刻から現在までの時間をハッブル時間といい，宇宙の年齢の目安となる。